تحلیل حساسیت و مقایسه عملکرد سه مدل مفهومی HBV، IHARCES و HEC-HMS در شبیه‌سازی بارش-رواناب پیوسته در حوضه‌های نیمه‌خشک (بررسی موردی: حوضه اعظم هرات-یزد)

مژگان یعقوبی[۱] و علیرضا مساح بوانی[۲*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران
[۲] دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۲/۵/۱۳، پذیرش نهایی: ۹۲/۱۱/۱۵)

چکیده

بخش وسیعی از کشور ما در قسمت خشک و نیمه‌خشک قرار دارد.. در این مناطق بارش معمولاً ناچیز و نامنظم است و تغییرات شدید مکانی و زمانی دارد که تأثیر زیادی بر چرخه هیدرولوژیکی و منابع آب دارد. شناخت هیدرولوژی مناطق خشک لازمه شناخت این محیط‌ها و تشخیص آسیب‌پذیری آنها به تغییر است. مدیریت موثر منابع آب ضروری است که نیازمند سامانه پشتیبانی تصمیم‌گیری شامل ابزارهای مدل‌سازی است. انتخاب مدل، نیاز به تشخیص قابلیت و محدودیت مدل‌های هیدرولوژیکی درحوضه دارد. در این مقاله عملکرد سه مدل مفهومی و پیوسته HBV، HEC-HMS و IHACRES در شبیه‌سازی بارش- رواناب حوضه نیمه‌خشک اعظم هرات مورد ارزیابی قرار گرفت. در تعیین عملکرد مدل‌ها از معیارهای عملکرد شامل ضریب نش (E)، ضریب تعیین (R^2) و معیارهای خطای Bias و RMSE استفاده شد. نتایج نشان داد، مدل HBV با ضریب نش ۰/۷۶، ضریب تعیین ۰/۷۷، معیار خطای ۰/۰۰۴- و۰/۷۲ بیشترین و مدل HEC-HMS با ۰/۶۲، ۰/۶۴، ۰/۰۰۷ و ۱/۳ کمترین کارایی را در دوره واسنجی دارند. در دوره صحت‌سنجی برای مدل HBV، این ضرایب ۰/۶۶، ۰/۶۷، ۰/۱۵- و ۰/۸ و برای مدل HEC-HMS، ۰/۵۷، ۰/۵۵، ۰/۰۳- و ۱/۰۲ است. درنهایت مشخص شد مدل HBV بهترین عملکرد در شبیه‌سازی رواناب پیوسته حوضه را دارد. در تحلیل حساسیت پارامترها ، حساس‌ترین پارامترهای مدلHBV (UZL، MAXBAS و BETA) ارزیابی شدند. پارامترهای Soil storage، Max infiltration و Tension storage به منزلهٔ پارامترهای حساس مدل HEC-HMS مشخص شدند که تأثیر زیادی بر نتایج خروجی مدل دارند. این در حالی است که پارامترهای مدل IHACRES، به میزان یکسان از خود حساسیت نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: مدل مفهومی بارش- رواناب پیوسته، حوزه رودخانه اعظم هرات، HBV، HEC-HMS، IHACRES

Sensitivity analysis and comparison of capability of three conceptual models HEC-HMS, HBV and IHACRES in simulating continuous rainfall-runoff in semi-arid basins

Yaghoubi, M.[1] and Massah Bavani, A. R.[2]

[1]*M.Sc. Graduate, Department of Science and Water Engineering, Collage of Aboureihan, University of Tehran, Iran*
[2]*Associate Professor, Department of Science and Water Engineering, Collage of Aboureihan, University of Tehran, Iran*

(Received: 04 Aug 2013, Accepted: 04 Feb 2014)

Summary

Arid and semi-arid regions of the world are confronted with limited water resources. A large part of Iran is arid and semi-arid and rainfall in arid and semi-arid regions is typically meager, irregular and highly variable. This irregularity affects the hydrological

[*]نگارنده رابط: تلفن: ۰۹۱۲۴۲۴۱۲۷۵ E-mail: armassah@ut.ac.ir

Archive of SID

www.SID.ir

cycle and water resources. Investigating the hydrology of the arid and semi arid regions is essential to know this environment and determine their vulnerability to changes. This is obvious that effective water resource management is necessary and this needs a decision support system that includes modeling tools. Choosing a model needs recognition of capability and limitations of hydrological models in watershed scale. In this paper for runoff simulation in semi-arid Azam Harat river basin, three conceptual continuous Rainfall–Runoff models HBV, HEC-HMS and IHACRES were used. HBV (Hydrologiska Byrans Vattenavdelning) model was firstly developed in Swedish meteorlogical and hydrological center in 1976. Up to now, the runoff simulations of different basins with different hydrological conditions have been evaluated by this model. This model simulates the continous runoff as well as flood single event of a basin, dividing the basin into several subbasins. Dividing subbasins is based on altitude and the vegetation of the basin. In this research we used the HBV-Light version. In this version Genetic Algorithm (GA) procedure is used to calibrate the parameters of the model. HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling System) model is a new version of HEC-1 model which has been used for simulation of both continous and single event runoff of a basin. On of the main advantage of this model is simulating the snow melt of the basin. In this research, the soil moisture algorithm was chosen, as the main methodoly of simulating runoff base on the fluctuations of rainfall, evapotranspiration and soil moisture losses. IHACRES model is based on non-linear loss module and linear unit hydrograph module. The process of simulation includes converting precipitation and temperature in each time step to effective rainfall by non-linear module, then converting to surface runoff by unit hydrographs linear modulus at the same time step.Some criteria of evaluation in this study are Nash coefficient (E), coefficient of determination (R^2), and the standard error of a root mean square error (RMSE) and Bias. The results show that HBV model with 0.76 Nash coefficient, 0.77 coefficient of determination, 0.72 RMSE and -0.004 Bias error and HEC-HMS with 0.62 Nash coefficient, 0.64 coefficient of determination and 1.3 RMSE and 0.007 Bias error have highest and lowest efficiencies in the calibration period, respectively. These values are 0.66, 0.67, 0.8 and -0.15 for HBV model and 0.55, 0.57, 1.02 and -0.03 for HEC-HMS model, respectively. Finally HBV model has the best performance in simulating rainfall according to watershed condition in the validation period. In parameter sensitivity analysis that was applied, the most sensitive parameters of HBV model were UZL, mAXBAS and BETA. In HEC-HMS model, parameters soil storage, Max infiltration and tension storage were the most sensitive parameters with greatest effect on the model output results. The parameters of IHACRES model demonstrate equal sensitivity.

Keywords: Conceptual rainfall, Runoff model, Azam Harat River basin, HBV, HEC-HMS, IHACRES

Archive of SID

۱ مقدمه

مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان با محدودیت منابع آب روبه‌رو هستند. بخش وسیعی از کشور ما نیز در قسمت خشک و نیمه‌خشک واقع شده است. در این مناطق بارش معمولاً ناچیز و نامنظم است و تغییرات شدید مکانی و زمانی دارد (باهات و همکاران، ۲۰۰۹). علاوه بر این زمان ریزش نزولات جوی همسو با نیازها نیست که این عامل از ویژگی‌های مناطق خشک است و تاثیر زیادی بر چرخه هیدرولوژیکی و منابع آب دارد. شناخت هیدرولوژی مناطق خشک لازمه شناخت این محیط‌ها و تشخیص آسیب‌پذیری آنها به تغییر است. آشکار است که مدیریت موثر منابع آب ضروری است که این نیازمند سامانهٔ پشتیبانی تصمیم‌گیری شامل ابزارهای مدل‌سازی است.

www.SID.ir

مدل‌سازی بارش رواناب پیوسته در این حوضه‌ها کاری چالش برانگیز است چرا که داده‌های شدت بارش برای محاسبه نفوذ و بارش مازاد در حکم داده‌های مهم ورودی هستند، اما توزیع مکانی بارندگی در سطح حوضه اغلب به‌خوبی با باران‌سنج نشان داده نمی‌شود (فارس و همکاران، ۱۹۹۵). تمرکز تحقیقات مرتبط با مدل‌سازی بارش رواناب پیوسته در مناطق خشک و نیمه‌خشک بر این پرسش‌ها است است (باهات و همکاران، ۲۰۰۹): ۱. چه سطحی از پیچیدگی مدل موردنیاز است؟ از لحاظ نظری تغییرپذیری زیاد بارندگی در این مناطق، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی پیچیده با دقت زیاد را می‌طلبد تا فرایندهای کوچک‌مقیاس را در حوضه نشان دهد. با این‌حال در عمل مدل‌های پیچیده اغلب نسبت به مدل‌های ساده‌تر پیش‌بینی دقیقی از رواناب پیوسته را فراهم نمی‌کند. الکراشی و همکاران (۲۰۰۸) حوضه خشکی را در عمان با مدل پیچیده kineros مدل‌سازی کردند اما عملکرد آن کم و ضعیف‌تر از یک مدل رگرسیون ساده بود. ۲. راهبرد مناسب برای واسنجی مدل چیست؟ با توجه به اینکه اکثر پارامترهای یک مدل، نیاز به واسنجی دارند، انتخاب پارامترها، تابع هدف و الگوریتم بهینه‌سازی تاثیر زیادی بر عملکرد مدل دارند. ۳. منبع اصلی عدم قطعیت در پیش‌بینی رواناب چیست؟ منابع احتمالی عدم قطعیت عبارت‌اند از: داده‌های بارندگی و رواناب، ساختار مدل، پارامترها و عدم قطعیت‌های طبیعی یادندرداس و همکاران (۲۰۰۸) روشن ساختند که برای یکی از زیرحوضه‌های Walnut Gulch در آریزونا، عدم قطعیت به علت اُریبی و بی‌نظمی در برآورد بارش بوده است که کاملاً باعث عدم قطعیت در واکنش حوضه می‌شود. منبع عمده عدم قطعیت در مدل‌سازی هیدرولوژیکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک خطای بارندگی است. فقدان داده‌های مشاهداتی یلندمدت عمده ترین مشکل در مناطق خشک است (پیلگریم و همکاران، ۲۰۰۹).

تاکنون مدل‌های بارش- رواناب پیوسته گوناگونی برای مناطق خشک و نیمه‌خشک عرضه شده است. برای مثال شامیر (۲۰۰۷) بسته نرم‌افزاری CRUM را برای مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب بالادست رودخانه Santa craz در جنوب آریزونا عرضه کرد. این مدل یک مدل توزیعی و دینامیکی بدون واسنجی است و برای حوضه خشک Nahal توسعه داده شده است. ابوشندی و مرکل (۲۰۱۱) در تحقیقی روی حوضه‌ای در شمال شرقی اردن که دارای اقلیم خشک بود مدل IHACRES را به کار گرفتند. مدل نتایج خوبی در خصوص بارش موثر و جریان به‌دست داد. بنابراین امکان استفاده از این مدل برای پیش‌بینی جریان در مناطق فاقد داده وجود دارد. یکی از منابع خطا در این شبیه‌سازی، پیچیدگی اقلیم و مقیاس زمانی شبیه‌سازی بود. رحیمی و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی برای پیش‌بینی جریان حوضه دوآب مرک از زیرحوضه‌های کرخه که دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است، از مدل پیوسته HEC-HMS استفاده کردند. در این تحقیق از نتایج مدل‌های عددی پیش‌بینی آب‌وهوا در اقلیم خشک و نیمه‌خشک و الگوریتم PERSIAN استفاده شد. از آنجا که بسیاری از پارامترهای موجود در الگوریتم SMA ارتباط خوبی با روش CN شماره منحنی دارند، مدل ابتدا به‌صورت تک‌واقعه‌ای با روش تلفات شماره منحنی، واسنجی شد و نتایج آن در روش SMA مورد استفاده قرار گرفت. نتایج معیارهای ارزیابی، کارکرد بهتر مدل‌سازی پیوسته را نشان داد. مسیح و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی مدل مفهومی بارش- رواناب پیوسته HBV را در حوضه کوهستانی و نیمه‌خشک کرخه و ۱۱ زیرحوضه آن برای بررسی کارایی این مدل و امکان انتقال پارامترهای واسنجی شده این حوضه به حوضه‌های فاقد آمار به کار بردند. ابتدا برای بررسی کارایی، مدل برای یک دوره ۷ ساله واسنجی و سپس در دوره ۷ ساله صحت‌سنجی شد. سپس منطقه‌ای کردن صورت گرفت.

Archive of SID

www.SID.ir

نتایج نشان داد که مدل با داشتن ضرایب قابل‌قبول عملکرد در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی، برای این حوضه کارایی دارد و همچنین با انتقال پارامترهای این حوضه به حوضه‌های فاقد آمار، نتایج قابل‌قبولی به‌دست آمد.

با توجه به تحقیقات گوناگون، مشخص شد که از سه مدل IHACRES، HEC-HMS و HBV بیشتر از مدل‌های دیگر برای شبیه‌سازی رواناب پیوسته در حوضه‌های خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار می‌گیرد. ارزیابی عملکرد این سه مدل در حوضه‌های خشک و نیمه‌خشک می‌تواند در انتخاب مدل کاراتر به پژوهشگران کمک کند. این مورد هدف این مقاله را رقم می‌زند که در آن در نظر است تا به مقایسه عملکرد این سه مدل در حوضه‌های خشک و نیمه‌خشک در حوضه اعظم-هرات پرداخته شود و با استفاده از تحلیل حساسیت، حساس‌ترین پارامترهای آنها مشخص شود؛ و درنهایت مدل مناسب بارش رواناب پیوسته به همراه حساس‌ترین پارامترهای مدل برای کاربردهای مهندسی در مناطق نیمه‌خشک و به‌خصوص مناطقی که با کمبود داده مواجه هستند تعیین شود.

۲ منطقه تحقیقاتی

حوزه آبریز رودخانه اعظم با وسعت ۱۰۸۴ کیلومترمربع در ۳۰ کیلومتری شرق ارسنجان و ۵۰ کیلومتری جنوب غرب مروست بین طول‌های جغرافیایی ۴۰/ ۵۳ الی ۵۴/۱۰ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۲۹/۴۰ الی ۳۰/۱۵ شمالی گسترده است. شکل ۱ حوضه آبریز رودخانه را نشان می‌دهد که از شمال با حوضه آبریز رودخانه بوانات، از غرب با حوضه آبریز رودخانه کر از جنوب با حوضه آبریز دریاچه طشک و از شرق با کویر هرات همجوار است) (گودرزی، ۱۳۸۹). حداکثر ارتفاع این حوزه ۳۱۵۳ متر و ارتفاع متوسط آن حدود ۲۱۹۲ متر از سطح دریا است. شیب عمومی منطقه کم است و حداکثر به ۲ تا ۳ درصد می‌رسد، طول این رودخانه حدود ۶۳ کیلومتر اندازه‌گیری شده است. دمای متوسط سالانه در حوضه ۱۰ درجه سلسیوس و متوسط بارندگی سالیانه آن ۲۶۵ میلی‌متر است که این ریزش در اکثر نقاط به‌صورت بارش است و چنانچه در بلندی‌ها ریزش برف هم وجود داشته باشد، با توجه به ناچیز بودن مقدار برف در برخی سال‌ها نمی‌توان انتظار داشت که وسعت حوزه آبریزی که زیر پوشش برفی قرار بگیرد چشمگیر باشد.

در این تحقیق برای متغیر بارش از میانگین بارش منطقه‌ای داده‌های روزانه ۷ ایستگاه باران‌سنجی (بندپایین، مزیجان، چاهک، قوری، ده چاه، آباده طشک و منج) و ۲ ایستگاه اقلیم‌شناسی (مروست، هرات) موجود در محدوده حوضه استفاده شد. برای دما از میانگین ماهانه ۵ ایستگاه اقلیم‌شناسی (مروست، هرات، مادر سلیمان، جهان آباد، مزیجان) و ۱ ایستگاه سینوپتیک (مروست) در اطراف حوضه استفاده شد (شکل ۱). در ادامه از میانگین داده‌های تبخیر ایستگاه تبخیرسنجی مروست و مزیجان که نزدیک‌ترین ایستگاه تبخیرسنجی حوضه است، برای محاسبه تبخیر پتانسیل استفاده شد. در ادامه ایستگاه هیدرومتری بندپایین در خروجی حوضه درحکم ایستگاه مبنا برای مشاهده تغییرات رواناب حوضه انتخاب شد (جدول ۱). لازم به ذکر است کلیه داده‌های حوضه در دوره آماری ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۸ تهیه شد.

۳ روش‌ها

مدل‌های هیدرولوژی نمایش ساده شده‌ای از سامانهٔ هیدرولوژی واقعی هستند که به بررسی کارکرد حوضه در واکنش به ورودی‌های گوناگون و فهم بهتر از فرایندهای هیدرولوژی کمک می‌کنند. باتوجه به تنوع مدل‌های بارش– رواناب در دسترس، انتخاب یک مدل بارش- رواناب مناسب برای حوضه به‌منظور بهره‌وری برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب مهم است. بنابراین،

Archive of SID

www.SID.ir

انتخاب مدل، نیاز به تشخیص قابلیت و محدودیت مدل‌های هیدرولوژی حوضه دارد (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۱). رایج‌ترین طبقه بندی مدل‌های بارش- رواناب براساس فرایندهای تولید رواناب را ابوت و رفسگارد در ۱۹۹۶عملی ساختند که نتایج آن در شکل ۲ آمده است.

مدل‌های قطعی (deterministic): مدل‌هایی هستند که در آنها، مجموعه مقادیر ورودی به مدل همیشه و دقیقاً همان مقادیر خروجی را تولید می‌کند.

مدل‌های احتمالاتی (stochastic): به علت وجود اجزای تصادفی مجموعه مقادیر ورودی موردنیاز همان داده‌های خروجی را تولید نمی‌کند.

مدل‌های فیزیکی (نظری یا جعبه سفید، White box): این مدل‌ها براساس قوانین فیزیکی‌اند و مجموعه‌ای از معادلات بقای جرم، تکانه و انرژی را که بر طبیعت حاکمیت دارند، دربر می‌گیرند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به SHE و REW اشاره کرد.

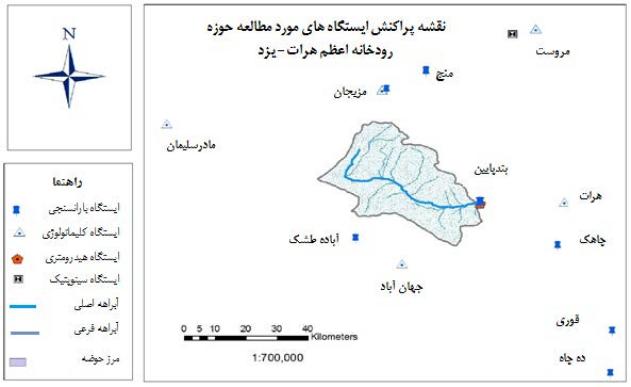
مدل‌های مفهومی (جعبه خاکستری، Gray box): مدل‌های مفهومی بر مبنای قوانین فیزیکی استوارند اما قادر خواهند بود که رفتارهای هیدرولوژیکی را با بیان تجربی شرح دهند و به علت اینکه ساختارهایشان مطابق با فرایندهای مهم است با مدل‌های فیزیکی تفاوت دارند. مدل‌هایی مانند HEC-HMS، TANK،SMAR، OPMODEL و HBV در این گروه جای می‌گیرند.

مدل‌های تجربی یا متریک (مدل‌های جعبه سیاه، black box): این مدل‌ها حوضه را درحکم یک واحد در نظر می‌گیرند و بر مبنای داده‌های مشاهداتی بارش و رواناب هستند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به روش آب‌نگاشت (هیدروگراف) واحد و روش استدلالی اشاره کرد.

این در حالی است که به‌لحاظ تفاوت در ماهیت زمانی داده‌های ورودی و نتایج خروجی، مدل‌های بارش رواناب به دو دسته تقسیم می‌شود: مدل‌های پیوسته Long scale) (continuous: در این مدل‌ها تمرکز روی درازمدت است و برای محاسبه میزان بازیابی رطوبت هم در دوره‌های بارندگی و هم در دوره‌های خشک که بارندگی وجود ندارد (فاصله بین دو واقعه بارندگی) به کار می‌رود. این مدل برای شبیه‌سازی جریان روزانه، ماهانه و فصلی و پیش‌بینی حجم رواناب طولانی‌مدت مناسب است.

مدل‌های تک‌واقعه‌ای یا رویدادگرا Short scale) (single event: این مدل‌ها برای شبیه‌سازی وقایع منحصر بارش رواناب و پاسخ حوضه به این رویداد بارش طراحی شده است. معمولاً این مدل‌ها برای بازیابی شرایط بین دو واقعه بارش ندارد (ذهبیون و همکاران، ۱۳۸۸) پس برای شبیه‌سازی جریان آب‌وهوای خشک (تجزیه و تحلیل خشک‌سالی) مناسب نیست.

در این تحقیق سه مدل مفهومی بارش- رواناب پیوسته به کار برده می‌شود که داده‌های موردنیاز برای این مدل‌ها در جدول ۲ آورده شده است.



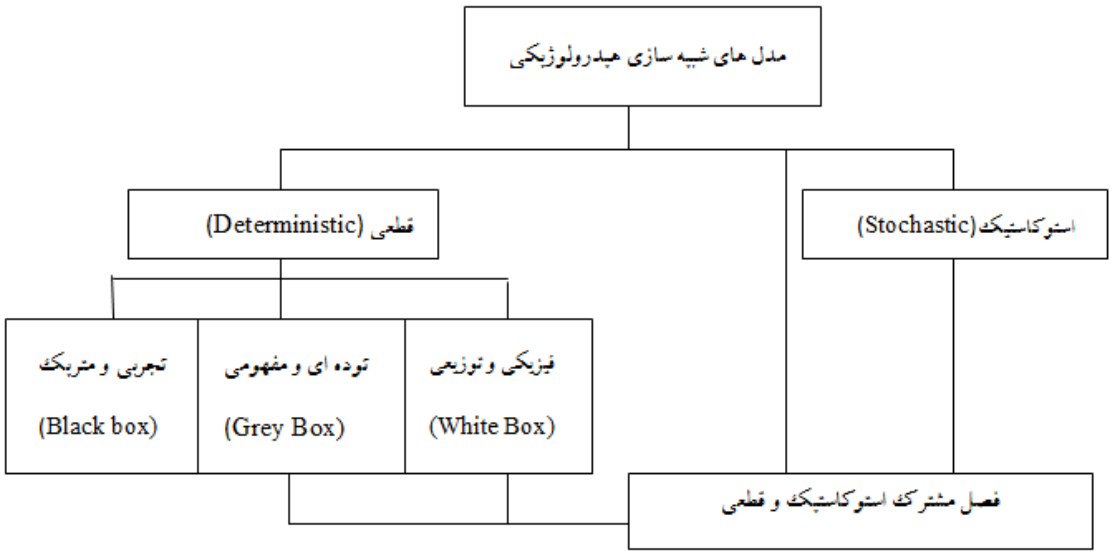
شکل ۱. نقشه حوزه رودخانه اعظم و ایستگاه‌های منتخب.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱. نام و نوع ایستگاه‌ها در محدوده حوضه.

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	ارتفاع از سطح دریا (متر)
بند پایین	بارانسنجی	۵۴-۰۵	۲۹-۵۵	۱۹۶۰
مزیجان	بارانسنجی	۵۳-۴۸	۳۰-۱۸	۲۰۹۰
چاهک	بارانسنجی	۵۴-۷/۱۸	۲۹-۲/۴۷	۱۶۹۶
قوری	بارانسنجی	۵۴-۲/۲۸	۲۹-۴/۳۰	۱۸۹۷
ده چاه	بارانسنجی	۵۴-۲۸	۲۹-۲/۲۲	۱۹۴۵
آباده طشک	بارانسنجی	۵۳-۶/۴۳	۲۹-۴۸/۷	۱۶۰۴
منج	بارانسنجی	۵۴ -۵۳	۳۰-۲۲	۱۸۵۰
مروست	اقلیم‌شناسی	۵۴-۱۱	۳۰-۲۹	۱۵۴۵
هرات	اقلیم‌شناسی	۵۴-۲۰	۲۹-۵۶	۱۶۰۷
مزایجان	اقلیم‌شناسی	۵۳-۲/۴۸	۳۰-۱۸	۲۱۲۰
جهان آباد	اقلیم‌شناسی	۵۳-۵۱/۷	۲۹-۴۳/۱	۱۵۸۹
مادر سلیمان	اقلیم‌شناسی	۵۳-۱۰	۳۰-۱۱	۱۸۶۵
مروست	سینوپتیک	۵۴-۱۵	۳۰-۲۹	۶/۱۵۴۶
بند پایین	هیدرومتری	۵۴-۵	۲۹-۵۵	۱۹۵۰



شکل ۲. تقسیم‌بندی مدل‌های هیدرولوژیکی، ابوت و رفسگارد (۱۹۹۶).

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲. داده‌های ورودی مدل‌ها.

مدل	داده‌های ورودی مورد نیاز
HBV	بارش ، دما ، دبی مشاهداتی (روزانه)- تبخیر پتانسیل (روزانه یا ماهانه)
HEC-HMS	بارش، دما، دبی مشاهداتی (روزانه)- تبخیر و تعرق (ماهانه)
IHACRES	بارش ، دما، دبی مشاهداتی (روزانه)

۳-۱ مدل HBV

مدل HBV (Hydrologiska Byrans Vattenavdelning) در موسسه هواشناسی و هیدرولوژیکی سوئد در اوایل دهه هفتاد توسعه داده شد (برگستروم، ۱۹۷۶). امکان استفاده از این مدل برای طیف وسیعی از حوضه‌ها با شرایط اقلیمی گوناگون وجود دارد. این مدل برای پیش‌بینی سیلاب در کشورهای اسکاندیناوی و بسیاری اهداف دیگر مانند طراحی سرریز، شبیه‌سازی سیلاب و ارزیابی منابع آب به کار می‌رود. این مدل یک مدل مفهومی و شامل محاسبات مفهومی برای فرایندهای هیدرولوژیکی در مقیاس حوضه است. این مدل می‌تواند در حکم مدلی نیمه توزیعی با تقسیم حوضه به چندین زیرحوضه اجرا شود. هر زیرحوضه با توجه به ارتفاع، دریاچه، یخچال‌های طبیعی و پوشش گیاهی به چندین ناحیه تقسیم می‌شود. نسخه استفاده شده در این تحقیق HBV-Light توسعه یافته مدل سیلبرت در سال ۲۰۰۲ است. کاربرد این مدل به دلایل زیر است:

۱) ساختار ساده ولی انعطاف‌پذیر آن که قابلیت تقسیم‌بندی به ناحیه‌های گوناگون ارتفاعی و گیاهی را دارد.

۲) به اطلاعات زیادی نیاز ندارد و داده‌های ورودی آن در دسترس است.

۳) در شرایط آب‌وهوایی متفاوت، قابلیت استفاده دارد.

مدل شامل روال‌هایی (Routine) برای انباشت و ذوب برف ، محاسبه رطوبت خاک و تولید رواناب است که درنهایت به‌کمک تابع وزنی ساده مثلثی، رواناب ایجاد شده را روندیابی می‌کند (سیبرت و ویس، ۲۰۱۲).

۱. روال برف: انباشت بارش هنگامی که دما کمتر از TT (آستانه دما) باشد به‌صورت برف خواهد بود (شکل ۳). ذوب برف وقتی شروع می‌شود که دما کمتر از TT باشد و از روش ساده درجه- روز (روابط (۱) و (۲)) برای محاسبه آن استفاده می‌شود.

$$Melt = CFMAX(T(t) - TT) \quad (۱)$$

$$Melt\ water = CFMAX(T - TT)(mm\ day^{-1} \quad (۲)$$

CFMAX فاکتور درجه − روز، TT آستانه دما، T(t) میانگین دمای روزانه، CFR ضریب تصحیح انجماد آب ذوب شده برف است.

۲. روال خاک: در این قسمت تغذیه آب زیرزمینی و تبخیر واقعی به‌صورت تابعی از ذخیره واقعی آب شبیه‌سازی می‌شود (شکل ۳). این قسمت اصلی‌ترین بخش کنترل شکل‌گیری رواناب است و دارای ۳ پارامتر در رابطه(۳) است:

$$\frac{Recharge}{P(t)} = \left(\frac{SM(t)}{FC}\right)^{Beta} \quad (۳)$$

BETA: پارامتری که سهم نسبیِ در رواناب (تابع عکس‌العمل یا افزایش رطوبت خاک) از هرمیلی‌متر بارش یا ذوب برف را کنترل می‌کند. FC: حداکثر ظرفیت ذخیره رطوبت در خاک. LP: پارامترِ نشانگر محدوده پتانسیل تبخیر است. LP مقدار رطوبت خاک است که بالاتر از آن تبخیر و تعرق به مقدار پتانسیل می‌رسد. این پارامتر به‌صورت درصدی از FC است. همچنین SM(t) ذخیره واقعی خاک و P(t) مجموع بارش و برف روزانه است.

۳. تابع عکس‌العمل: در این بخش رواناب محاسبه شده

Archive of SID

www.SID.ir

تبدیل به دبی در خروجی زیرحوضه می‌شود. با در نظر گرفتن دو لایه خاک، بارش ورودی با توجه به رابطه ۴ در حالت‌های زیر از آن خارج می‌شود: خروج از لایه اول با ضریب ذخیره سریع K1، نفوذ به لایه زیرین خاک با نرخ ثابت نفوذ PERC، اگر آستانه UZL (پارامتر آستانه) از حالت ذخیره تجاوز کند مازاد آن با ضریب ذخیره K_0 خارج می‌شود و درنهایت آب از لایه زیرزمینی با ضریب ذخیره آهسته K2 خارج می‌شود.

$$Q(t) = KK_1SUZ + K_2SLZ + K_{0max}(SUZ - UZL, 0) \qquad (۴)$$

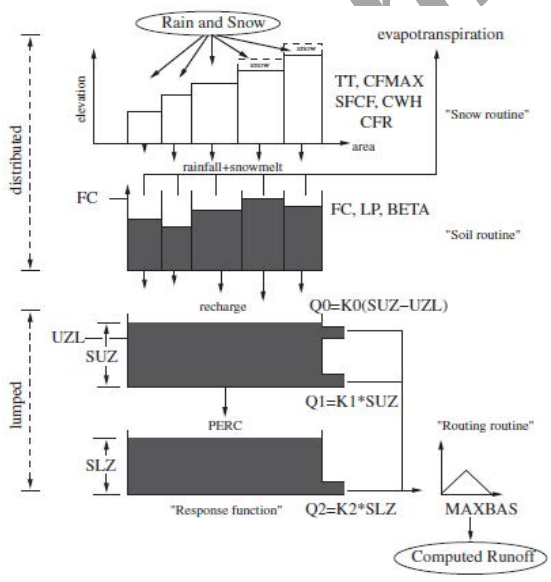
در این رابطه Q(t) خروجی دو مخزن است.

۴. روال روندیابی: این رواناب درنهایت از تابع وزنی مثلثی با پارامتر MAXBAS برای روندیابی جریان محاسبه شده در خروجی حوضه استفاده می‌شود (شکل ۳).

برای واسنجی مدل HBV، الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm) که یک روش واسنجی خودکار است، طی واسنجی مدل به کار برده شد. پارامترهای مدل و محدوده آنها در جدول ۳ آورده شده است.

۳-۲ مدل HEC-HMS

مدل HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) نسخه جدید HEC-1 برای شبیه‌سازی بارش -رواناب از اولین سری نرم‌افزارهای تهیه شده مرکز هیدرولوژی مهندسی امریکا در ۱۹۶۸ است. این مدل مدل مفهومی و نیمه‌توزیعی است که به‌صورت تک‌واقعه‌ای و پیوسته کاربرد دارد. از جمله قابلیت‌های این مدل دارا بودن روالی برای محاسبه رواناب ناشی از ذوب برف است. در این تحقیق شبیه‌سازی پیوسته با HEC-HMS مدنظر بوده است و بنابراین برای محاسبه تلفات از روش (Soil Moisture Accounting) که شامل الگوریتم محاسبه رطوبت خاک است و برای شبیه‌سازی ارتباط طولانی مدت بین بارش، رواناب، ذخیره، تبخیر و تعرق و تلفات خاک در حوضه است، استفاده می‌شود (شکل ۴). با توجه به اینکه پوشش برفی در این حوضه اندک است، رواناب ناشی از ذوب برف در نظر گرفته نمی‌شود و نیازی به داده‌های دما نیست. این الگوریتم سطح حوضه را به ۵ قسمت تقسیم می‌کند که دو قسمت آن بالای سطح خاک و ۳ لایه که زیر زمین در نظر گرفته می‌شود. ۱۲ پارامتر برای مدل‌سازی فرایندهای برگاب، ذخیره سطحی، نفوذ عمقی و ذخیره زیرزمینی مورد نیاز است. با توجه به این الگوریتم، تبخیر و تعرق در دوره‌های خشک و از گیرش گیاهی و سپس ذخیره سطحی و بعد، از نیم‌رخ خاک تعیین می‌شود. از سوی دیگر نفوذ عمقی زمانی صورت می‌گیرد که ظرفیت نگه‌داشت سطحی به‌طور کامل پُر شده است. از روش کلارک برای تبدیل بارش به رواناب استفاده شد و برای محاسبه جریان پایه از روش فروافتادگی (Recession) استفاده می‌شود. به علت محدودیت مدل در شبیه‌سازی پیوسته برای واسنجی خودکار مدل، واسنجی به‌صورت دستی صورت گرفت و پارامترها به‌صورت سعی و خطا وارد مدل شدند.



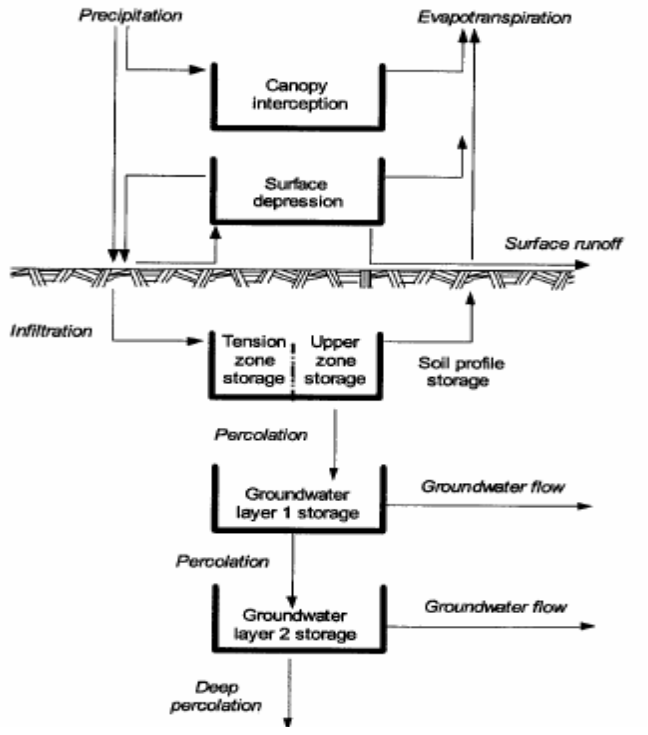
شکل ۳. ساختار کلی مدل HBVt، (سیبرت، ۲۰۰۰).

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۳. پارامترهای مورد استفاده مدل و محدوده آن‌ها طی واسنجی خودکار مدل با الگوریتم ژنتیک.

پارامتر	واحد	توضیح	محدوده
Snow routine			
TT	C^o	آستانه دما	-۲-۰
CFMAX	$mm\ C^{o1}d^{-1}$	فاکتور درجه - روز	۰/۵-٤
SFCF	-	فاکتور تصحیح برف	۰/۵-۰/۹
CFR	-	ضریب انجماد مجدد	۰/۰۵
CWH	-	ظرفیت ذخیره آب	۰/۱
Soil routine			
FC	mm	بیشینه ذخیره در خاک	۱۰۰-۵۵۰
LP	-	آستانه کاهش تبخیر	۰/۳-۱
BETA	-	ضریب ذخیره و نفوذ عمقی خاک	۱-۵
Response routine			
PERC	mmd^{-1}	جریان بیشینه از لایه بالایی به پایین	۰-٤
UZL	mm	آستانه خروجی از مخزن پایین	۰-۷۰
K_0	d^{-1}	ضریب فروکش(بالای مخزن پایین)	۰/۱-۰/۵
K_1	d^{-1}	ضریب فروکش(پایین مخزن بالایی)	۰/۰۱-۰/۲
K_2	d^{-1}	ضریب فروکش(مخزن پایین)	۰/۰۰۱-۰/۰۵
Routing routine			
MAXBAS	d	روندیابی، طول تابع وزنی	۱-۲/۵



شکل ٤. ساختار الگوریتم (سازمان مهندسی ارتش امریکا، ۲۰۰۰) SMA.

Archive of SID

www.SID.ir

۳-۳ مدل IHACRES

این مدل، مدلی مفهومی و یکپارچه است که در مناطق آب‌وهوایی متفاوت، از جمله مناطق خشک و نیمه‌خشک کاربرد دارد (کروک و جیکمن، ۲۰۰۸). مدل IHACRES در مناطق خشک به علت اینکه جریان‌های زودگذر وجود دارند و واکنش به متغیرهای اقلیمی سریع‌تر صورت می‌گیرد، قابل اجرا است. هدف اصلی مدل IHACRES تعیین رفتار هیدرولوژیکی حوضه با استفاده از تعداد کمی از پارامترها است. اساس این روش از مدول غیرخطی کاهش و مدول خطی آب‌نگاشت تشکیل می‌شود. در ابتدا بارندگی با مدول غیرخطی، به k در هرگام زمانی $t(k)$ و دما$r(k)$ تبدیل و سپس به‌کمک مدول خطی u_k بارندگی مؤثر آب‌نگاشت واحد به رواناب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می‌شود (شکل ۵). روابط به کار رفته در مدول غیرخطی کاهش به‌منظور تبدیل بارش به بارندگی مؤثر در حوضه به شرح زیر است:

$$u_k = s_k \times r_k \qquad (۵)$$

$$S_k = C \times r_k + (1 + \frac{1}{\tau w(tk)})^{sk-1}$$

$$S_0 = 0 \qquad (۶)$$

$$\tau_w(t_k) = \tau_w e^{0.062f(R-tk)}$$

$$\tau_w(t_k) > 1 \qquad (۷)$$

$$X_k = a^q X_{k-1} - b^q u_{k-1} + a^s X_{k-1} - b^s u_{k-1} \qquad (۸)$$

در این رابطه‌ها، S_k ضریب رطوبتی حوضه است که تابعی از تبخیر و تعرق در حوضه است و با رابطه‌های (۶) و (۷) بیان می‌شود. در رابطه (۷)، $\tau_w(t_k)$ مقدار شاخص S_k را در رابطه (۶) هنگامی که بارش رخ نمی‌دهد، کنترل می‌کند. در این رابطه R دمای مرجع و τ_w ثابت زمانی خشک شدن حوضه و f فاکتور تعدیل دما است. در رابطه (۵) پارامتر C به گونه‌ای تعیین می‌شود که حجم بارندگی مؤثر و رواناب مشاهداتی در دوره واسنجی یکسان شود. سپس بارندگی موثر با مدول خطی آب‌نگاشت (رابطه (۸)) به رواناب سطحی تبدیل می‌شود. در رابطه (۸) پارامترهای q و s پارامترهای مربوط به تفکیک آب‌نگاشت حوضه به دو قسمت سریع (q) و آب‌نگاشت کُند (s) است. در این روش سه پارامتر τ_w، f وc از مدول غیرخطی کاهش (رابطه‌های (۵)، (۶) و (۷)) و سه پارامتر از چهار پارامتر (a^q, a^s, b^q) b^s از مدول خطی آب‌نگاشت (رابطه (۸)) می‌باید براساس داده‌های مشاهداتی برای حوضه مورد بررسی واسنجی شوند.

۴-۳ معیارهای ارزیابی

با توجه به اهمیت انتخاب تابع هدف، در این تحقیق عملکرد مدل‌ها با تابع‌های هدف زیر مورد بررسی قرار گرفته است. اولین تابع، ضریب تعیین (R^2) است که نشان می‌دهد بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی چه درجه‌ای از وابستگی وجود دارد (رابطه (۹)). دومین معیار، تابع نش (E) بوده و نسبت واریانس باقی‌مانده به واریانس دبی‌ها را نشان می‌دهد (رابطه (۱۰)). RMSE و Bias معیارهای خطا هستند (روابط (۱۱)، (۱۲)) که کمتر شدن آنها به منزله اختلاف حداقل بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی است و نشان از عملکرد بهتر مدل دارند.

$$R^2 = \left[\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Qobs-Qobs)(Qsim-Qsim)}{Qobs \times Qsim}\right]^2 \qquad (۹)$$

$$E = 1 - \left[\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Qobs-Qsim)^2}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Qobs-\overline{Q_{obs}})^2}\right] \qquad (۱۰)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{(Qsim-Qobs)^2}{n}} \qquad (۱۱)$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{sim}-Q_{obs})}{n} \qquad (۱۲)$$

Q_{obs} و Q_{sim} دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ، n تعداد مشاهدات و $\overline{Q_{obs}}$ و $\overline{Q_{sim}}$ به‌ترتیب متوسط دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی هستند.

Archive of SID

www.SID.ir

۳-۵ تحلیل حساسیت

واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی شامل مراحل گوناگونی است که هرکدام از آنها با منابع متفاوت عدم قطعیت همراه است که عدم قطعیت را به نتیجه نهایی پیش‌بینی مدل منتقل می‌کند. نتایج مدل‌سازی برای شرایط هیدرولوژیکی فعلی در مقیاس حوضه‌ای دارای کیفیت متوسطی است. برای نمونه شرایط حدی در داخل بازه واسنجی شده کم و یا بیش برآورد می‌شود. همچنین جدا کردن اثرات ناشی از خطاهای داده‌های ورودی و خطاهای ساختار مدل به سختی صورت می‌پذیرد. این مسائل خود منجر به افزایش خطاهای ذاتی در هنگام استفاده از مدل در خارج از محدوده واسنجی می‌شود. بوتز و همکاران (۲۰۰۴) در تحقیقی اعلام کردند منابع خطا و عدم قطعیت در مدل سازی قطعی را می‌توان به ۴ دسته تقسیم کرد:

خطای تصادفی یا سامان‌مند در داده‌های ورودی (مانند بارش،دما، تبخیر)

خطای تصادفی یا سامان‌مند در داده‌های به کار رفته برای مقایسه با نتایج واسنجی مدل (آبدهی مشاهده شده)

خطا به واسطه مقادیر پارامترهای غیر بهینه

خطا به علت ساختار مدل

پارامترها بخشی از ساختار مدل هستند که برای تنظیم کردن نتایج خروجی مدل از آنها استفاده می‌شود و با روش‌های گوناگونی شامل: جدول‌های مراجعه‌ای قیاسی(برای پارامترهای فیزیکی خاک)، واسنجی دستی یا خودکار با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی و استفاده از تابع‌های انتقال بین حوضه‌های مشابه برآورد می‌شوند. عدم قطعیت پارامترها در مدل‌سازی فرایندها، درست‌نمایی نتایج را وقتی که از مدل هیدرولوژیکی معین در حکم ابزار پیش‌بینی استفاده می‌شود، تحت‌تاثیر قرار می‌دهد (ابیب و همکاران، ۲۰۱۲) به‌هرحال تحلیل صحیح و مفصل پارامترهای مدل و ساختار مدل وابسته به آن می‌تواند به برآورد و کاهش عدم قطعیت‌هایی که پیش‌بینی مدل را تحت‌تاثیر قرار دهد، کمک کند. به این منظور تحلیل حساسیت یکی از مباحث مرکزی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی است. ارزیابی اثرات تغییر در مقدار فاکتور (پارامترها با متغیرهای حالت و ورودی) بر پاسخ شبیه‌سازی شده مدل موردنظر، تحلیل حساسیت (Sensitivity Analysis) نام دارد. از نظر عدم قطعیت SA تاثیر عدم قطعیت‌های پارامترها بر عدم قطعیت پاسخ مدل است. بنابراین فاکتور موثرتر، تاثیر بیشتری بر عدم قطعیت خروجی دارد. تحلیل حساسیت عبارت است از درصد تغییر در مقدار تابع هدف در نتیجه تغییر در مقدار پارامتر است و روشی برای تعیین این است که کدام یک از پارامترهای مدل بیشترین تاثیر را در نتایج مدل دارد. این کار پارامترهای مدل را برحسب مشارکت در خطای کلی در پیش‌بینی نتایج رتبه بندی می‌کند. تحلیل حساسیت ممکن است کلی (Global) یا موضعی (Local) باشد (کاندرلیک و همکاران، ۲۰۰۴). در تحلیل حساسیت local تاثیر هریک از پارامترهای ورودی به‌صورت جداگانه با ثابت نگه داشتن دیگر پارامترها تعیین می‌شود. در تعیین حساسیت global همه ورودی‌های مدل امکان تغییر در محدوده تغییرشان در یک زمان وجود دارد (هان،۲۰۰۲). جین و همکاران (۲۰۰۹) در پژوهش خود برای تحلیل حساسیت پارامترهای مدل HBV از معیار نش استفاده کردند. در تحقیق دو معیارNASH و RMSE به عنوان توابع هدف برای انجام تحلیل حساسیت انتخاب شدند.

تحلیل حساسیت به چند منظور صورت می گیرد (هان، ۲۰۰۲):

۱) کدام پارامتر نیاز به پژوهش بیشتر دارد که از آن راه، عدم قطعیت ورودی کاهش یابد؟

۲) تاثیر کدام پارامتر ناچیز است و می‌توان آن را از مدل نهایی حذف کرد؟

Archive of SID

www.SID.ir

۳) کدام ورودی‌ها بیشتر در تغییرپذیری خروجی‌ها شرکت دارد؟
۴) کدام پارامترها بیشترین همبستگی را با خروجی دارند؟
۵) چه نتیجه منطقی از تغییر یک پارامتر منتج می‌شود؟

رضاییان‌زاده و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی که با استفاده از مدل HEC-HMS در حوضه‌ای در استان فارس عملی ساختند، الگوریتم SMA را به کار بردند. ایشان به‌منظور برداشتن پارامترهای غیرحساس از خروجی مدل، از روش تحلیل حساسیت چندمعیاره استفاده کردند. نتایج نشان داد که خروجی SMA نسبت به تغییر پارامترهایی مانند ذخیره خاک(soil storage) و نرخ نفوذ خاک (soil percolationrate) غیر حساس است. روی و همکاران (۲۰۱۳) در تحقیقی مدل HEC-HMS را برای شبیه‌سازی جریان در حوضه Subarnarekha در هند به کار بردند. تحلیل‌هایی که توسط ایشان صورت گرفت نشان داد که پارامترهای خاک مانند ذخیره خاک (soil storage, tension zone storage) و ضریب ذخیره لایه زیرزمینی اول (groundwater 1 storage coefficient) پارامترهای حساس برای شبیه‌سازی جریان در این حوضه هستند.

در این تحقیق برای تعیین حساس‌ترین پارامتر که تاثیر بیشتری بر نتایج خروجی مدل دارد از روش (local) استفاده شد. در مدل HBV سناریویی که استفاده شد، افزایش و کاهش مقدار پارامترها تا ۶۰ درصد مقدار اولیه آنها است؛ درصورتی‌که پارامترهای دیگر ثابت نگه داشته شد تا نتیجه این تغییر با استفاده از دو تابع هدف Nash و RMSE ارزیابی شود. از بین پارامترهای این مدل ۹ پارامتر آن (۳ پارامتر روال خاک، ۵ پارامتر روال واکنش و ۱ پارامتر روندیابی) برای تحلیل حساسیت در نظر گرفته شد. به علت نبود پوشش برفی چشمگیر پارامترهای مربوط به ذوب برف در تحلیل حساسیت در نظر گرفته نشد. در مدل HEC-HMS سناریوی استفاده شده کاهش و افزایش مقدار پارامترها تا ۲۰ درصد مقدار اولیه پارامترها بود. پارامترهایی که برای تحلیل حساسیت مدل در نظر گرفته می‌شود شامل، ۱۲پارامتر تلفات SMA، ۲ پارامتر انتقال رواناب، ۲ پارامتر مربوط به گیرش بارش از راه پوشش گیاهی و خاک و ۵ پارامتر شرایط اولیه حوضه است که از این میان ۵ پارامتر مربوط به شرایط اولیه در تحلیل حساسیت به حساب نمی‌آید. برای مدل IHACRES پارامترها تا۶۰ درصد افزایش و کاهش یافت تا مشخص شود کدام پارامتر تاثیر بیشتری در مدل دارد و کدام پارامتر کمترین تاثیر را دارد؟

۴ بحث

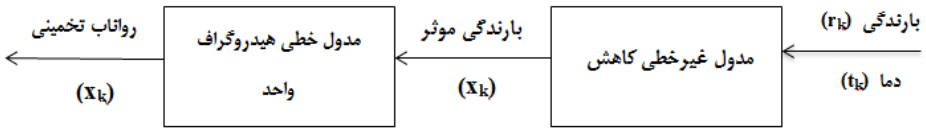
۴-۱ شبیه‌سازی بارش - رواناب توسط مدل HBV

دوره واسنجی و اعتبارسنجی مدل باید در شرایط آب‌وهوایی یکسان قرار داشته باشند و هرچه دوره مدل‌سازی طولانی‌تر باشد، روندها در آن بهتر دیده می‌شود و نتایج بهتری به‌دست می‌آید. ابتدا یک دوره ۷ ساله (۱۹۹۹/۱۰/۱-۲۰۰۶/۹/۳۰) برای واسنجی مدل انتخاب شد. قبل از واسنجی یک دوره ۲۷۳ روزه (۱۹۹۹/۱/۱-۱۹۹۹/۹/۳۰) برای دوره آماده سازی (Warming up) لحاظ شد و سپس برای نشان دادن اینکه آیا مدل برای این منطقه قابلیت پیش‌بینی رواناب را برای دوره خارج از دوره واسنجی دارد یا خیر، دوره (۱۹۹۵/۱۰/۱-۱۹۹۸/۹/۳۰) برای صحت‌سنجی مدل استفاده شد. همان‌طورکه از شکل ۶ مشخص است این مدل در دوره واسنجی جریان پایه را بیشتر برآورد می‌کند البته جریان ناشی از بارندگی‌ها را به‌جز در چند واقعه بارندگی به‌خوبی توانسته است شبیه‌سازی کند اما در دوره صحت‌سنجی (شکل ۷) امکان شبیه‌سازی دقیق جریان بالا با همان مجموعه پارامترها را نمی‌دهد. یعنی در برخی از موارد دبی را کمتر از مقدار مشاهداتی شبیه‌سازی کرده است که این به علت ساختار نسبتاً ساده و مفهومی مدل است که با یک لایه زیرزمینی رواناب تولید می‌کند. اما

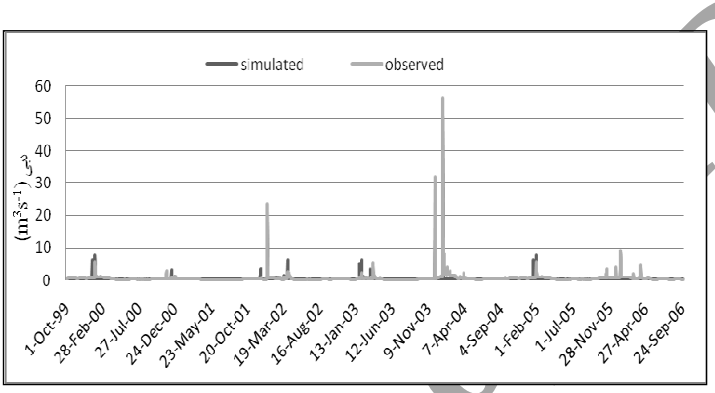
Archive of SID

www.SID.ir

در کل نتایج معیارهای عملکرد خوب و مناسب در دوره واسنجی و صحت‌سنجی روشن ساخت که مدل با پارامترهای بهینه شده می‌تواند به‌خوبی شبیه‌سازی بارش- رواناب را برای این حوضه عملی سازد (جدول ۴).



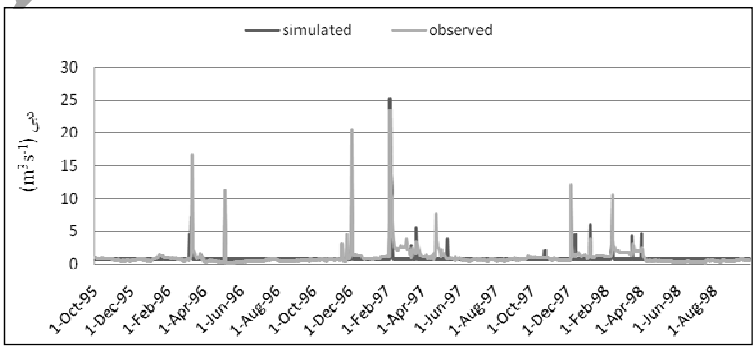
شکل ۵. شبیه‌سازی بارش- رواناب در مدل IHACRES (جکمن و هورمبرگر، ۱۹۹۳).



شکل ٦. سری زمانی دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی با مدل HBV.

جدول ٤. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل HBV.

					Volume balance		
	R^2	Nash-E	Bias	RMSE	Observed ($mm.y^{-1}$)	Simulated ($mm.y^{-1}$)	Difference
واسنجی	۰/۷۸	۰/۷۷	-۰/۰۰٤	۰/۷۱	۲۰۲	۲۰۰	۲
صحت‌سنجی	۰/٦۷	۰/٦٦	-۰/۱۵	۰/۸	۳۵۸	۳۱۳	٤۵



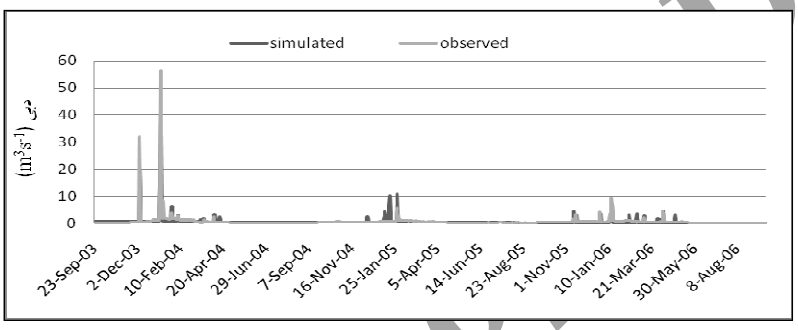
شکل ۷. سری زمانی دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دوره صحت‌سنجی با مدل HBV.

Archive of SID

www.SID.ir

۴-۲ شبیه‌سازی بارش - رواناب با HEC-HMS

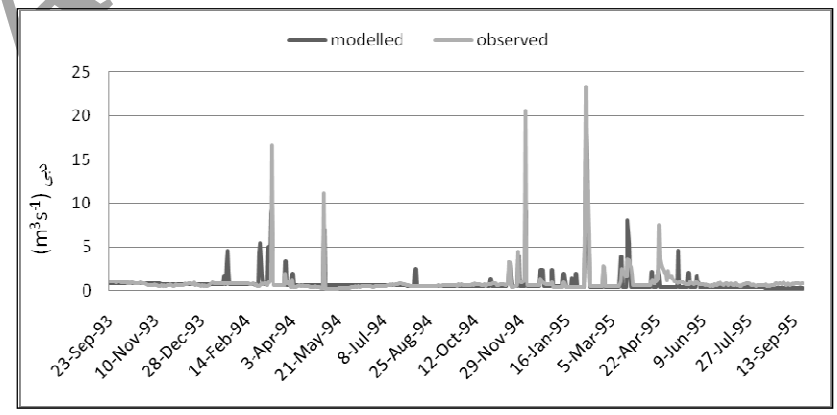
نتایج واسنجی در جدول ۵ آورده شده است. برای واسنجی این مدل، شبیه‌سازی‌ها از ابتدای سال آبی یعنی اول پاییز شروع می‌شود تا مقدار اولیه برخی پارامترهای موردنیاز صفر در نظر گرفته شود. از یک دوره ۳ ساله برای واسنجی مدل و یک دوره ۲ ساله برای صحت‌سنجی استفاده شد. همان‌طورکه شکل ۸ نشان می‌دهد مدل در فصل بهار و زمستان جریان‌ها را کمتر برآورد می‌کند اما در فصل پاییز و تابستان مدل جریان را دست‌بالا شبیه‌سازی کرده است. معیارهای ارزیابی در دوره واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۵ آورده شده است. با توجه به مقادیر معیارهای ارزیابی، مدل، شبیه‌سازی قابل‌قبولی از حوضه را عملی ساخته است؛ با این حال دبی‌های پیک را نتوانسته است شبیه‌سازی کند. با توجه به شکل ۹ شبیه‌سازی جریان در دوره صحت‌سنجی نسبت به واسنجی مدل نتایج ضعیف‌تری به‌دست داده است.



شکل ۸. سری زمانی رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی با مدل HEC-HMS.

جدول ۵. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS.

	دوره	R^2	Nash	Bias	RMSE
واسنجی	(۲۰۰۶/۹/۲۲-۲۰۰۳/۹/۲۳)	۰/٦٤	۰/٦۲	۰/۰۰۷	۱/۳
صحت‌سنجی	(۱۹۹۵/۹/۲۲-۱۹۹۳/۹/۲۳)	۰/۵۷	۰/۵۵	۰/۰۳	۱/۰۲



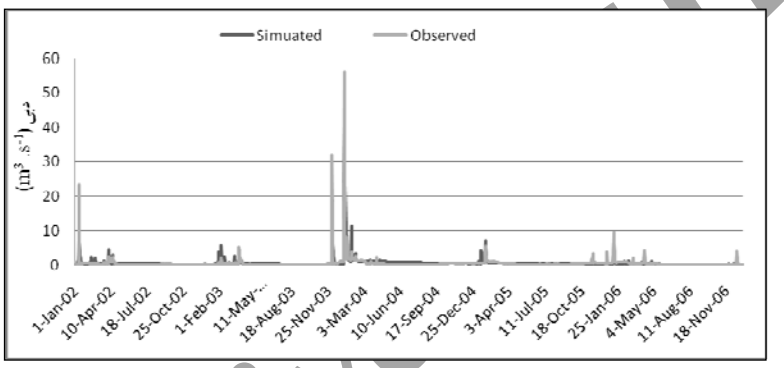
شکل ۹. سری زمانی رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره صحت‌سنجی با مدل HEC-HMS.

Archive of SID

www.SID.ir

۴-۳ شبیه‌سازی بارش - رواناب توسط IHACRES

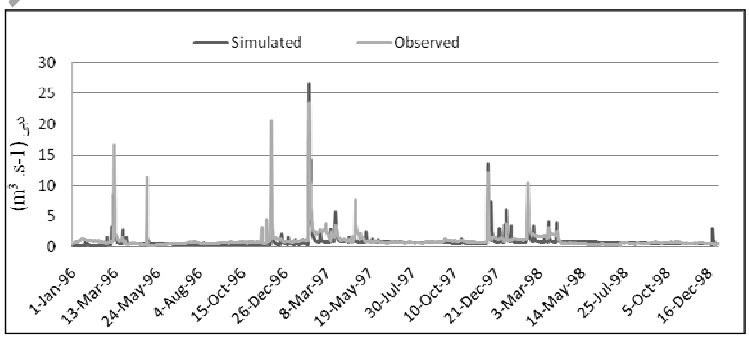
طبق نظر کروک و جیکمن (۲۰۰۸)، موضوع مهم در این مدل، فراوانی وقایع است که در مناطق خشک و نیمه‌خشک نسبت به حوضه‌های مرطوب‌تر وقایع جریان فراوانی کمتری دارند. این بدان معنی است که برای کاهش عدم قطعیت در پارامترهای مدل و به علت وقوع کمتر وقایع بارندگی، طول دوره واسنجی می‌باید تا جای ممکن بیشتر در نظر گرفته شود. مقادیر پارامترهای واسنجی شده مدل برای حوضه رودخانه موردنظر به‌صورت سعی‌وخطا برآورد شد. با توجه به معیارهای عملکرد مدل در دوره واسنجی (جدول ۶)، مدل توانایی لازم برای شبیه‌سازی‌های دبی حوضه موردنظر را دارد. بر اساس نتایج شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مدل در هر دو دوره توانایی کمتری در شبیه‌سازی دبی‌های حداکثر دارد، به‌طوری‌که دبی‌های کمتری را نسبت به دبی‌های حداکثر مشاهداتی شبیه‌سازی کرده است. همین مشکل در دوره صحت‌سنجی بیشتر نمود پیدا کرده است و منجر به کم شدن ضریب نش دراین دوره شده است.



شکل ۱۰. سری زمانی رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی با مدل IHACRES.

جدول ٦. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل IHACERS.

	دوره	R^2	Nash-E	Bias	RMSE
واسنجی	(۲۰۰٦/۱۲/۳۱-۲۰۰۲/۱/۱)	۰/۷	۰/٦۹	۰/۱	۰/۹
صحت‌سنجی	(۱۹۹۸/۱۲/۳۱-۱۹۹٦/۱/۱)	۰/٦٦	۰/٦۳	-۰/۲	۱/۳



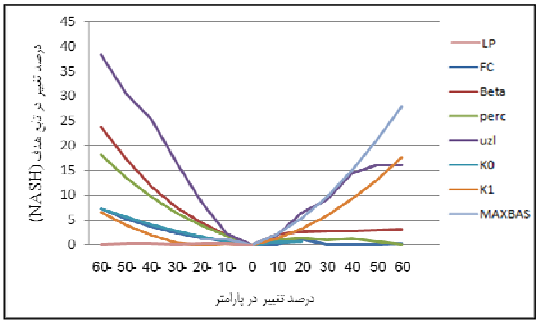
شکل ۱۱. سری زمانی رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره صحت‌سنجی با مدل IHACRES.

Archive of SID

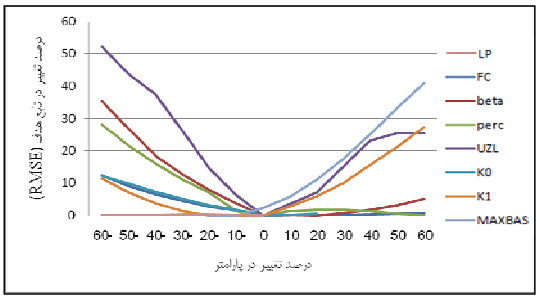
www.SID.ir

۴-۴ تحلیل حساسیت

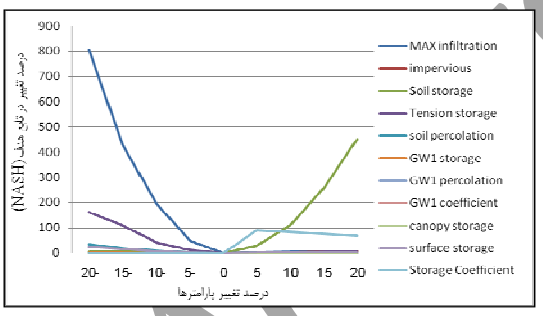
تعداد پارامترهای مدل IHACRES نسبت به دو مدل دیگر کمتر بود (وجود تنها دو پارامتر در مدل IHACRES) و در تابع‌های هدف مدل با تغییر پارامترها در محدوده موردنظر تغییر محسوسی مشاهده نشد. در بین پارامترهای مدل HBV با توجه به معیار RMSE، سه پارامتر UZL،BETA و MAXBAS از پارامترهای بسیار حساس هستند و از جمله پارامترهایی هستند که سری جریان‌های بالا را کنترل می‌کنند. بنابراین حساسیت زیادی نسبت به معیار RMSE دارند. دو پارامتر K1 و Perc جزء پارامترهای نیمه‌حساس محسوب می‌شوند. همچنین با توجه به معیار نش دو پارامتر UZL و MAXBAS پارامتر حساس و پارامترهای BETA، Perc و K1 از پارامترهای نیمه‌حساس به شمار می‌آید. با کاهش مقدار پارامتر UZL عکس‌العمل‌های سریع حوضه نیمه‌حساس قرار می‌گیرد و مقدار دبی اوج افزایش می‌یابد و از آنجا که تابع هدف وابسته به مقدار جریان است، به‌شدت بر تابع هدف تأثیر می‌گذارد (خطیبی، ۱۳۹۰). حساسیت پارامتر MAXBAS به افزایش مقدار، بیش از کاهش آن است، چرا که با افزایش مقدار آن دبی در حوضه پخش می‌شود و دبی اوج کاهش می‌یابد و در زمان وقوع آن تاخیر ایجاد می‌شود که درنهایت تابع هدف تغییرات زیادی را متحمل می‌شود. از بین پارامترهای روال خاک حوضه نسبت به کاهش پارامتر BETA حساسیت بیشتری نشان می‌دهد. این پارامتر توان نسبت بین رطوبت خاک به ظرفیت مزرعه است. مقدار رطوبت خاک که در دسترس تبخیر و تعرق است به آن بستگی دارد. تأثیر شدید این پارامتر روی خطای حجم است (ابیب و همکاران، ۲۰۱۰). دو معیار هدف با تغییر پارامتر K2 هیچ تغییری نداشت، بنابراین مدل نسبت به این پارامتر هیچ حساسیتی ندارد. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ تغییرات تابع‌های هدف را با تغییرات پارامترها در مدل HBV نشان می‌دهد.



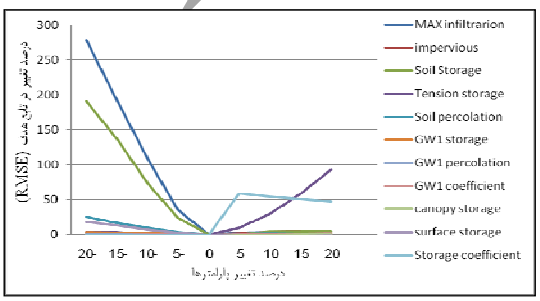
شکل ۱۲. نمودار حساسیت پارامترهای HBV با مبنای مقایسه Nash.



شکل ۱۳. نمودار حساسیت پارامترهای HBV با مبنای مقایسه RMSE.



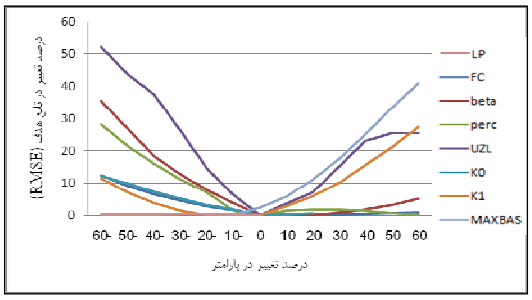
شکل ۱۴. نمودار حساسیت پارامترهای HEC-HMS با مبنای مقایسه Nash.



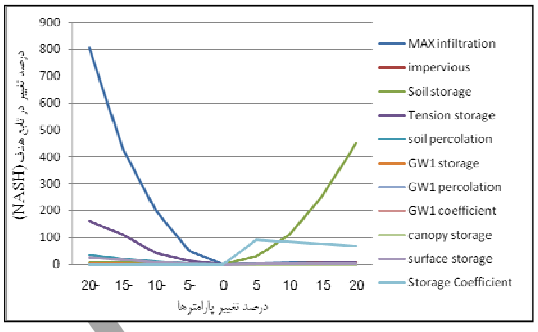
شکل ۱۵. نمودار حساسیت پارامترهای HEC-HMS با مبنای مقایسه RMSE.

Archive of SID

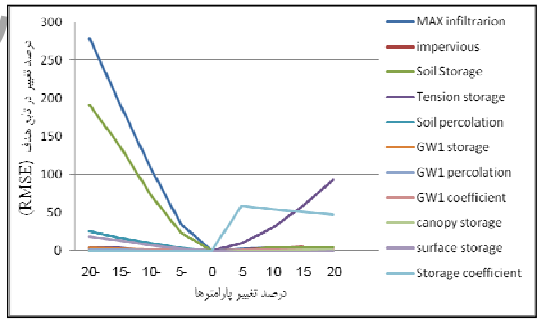
www.SID.ir



شکل ۱۳. نمودار حساسیت پارامترهای HBV با مبنای مقایسه RMSE.



شکل ۱۴. نمودار حساسیت پارامترهای HEC-HMS با مبنای مقایسه Nash.



شکل ۱۵. نمودار حساسیت پارامترهای HEC-HMS با مبنای مقایسه RMSE.

در تحلیل حساسیت برای مدل HEC-HMS مشخص شد که از بین پارامترهای الگوریتم SMA، پارامتر نفوذ infiltration و soil storage و به تبع آن پارامتر tension zone پارامتر بسیار حساس و پارامتر percolation rate از پارامترهای نیمه‌حساس است. مدل نسبت به سه پارامتر SMA مربوط به لایه زیرزمینی دوم هیچ حساسیتی ندارد. از بین بقیه پارامترهای مدل، پارامتر آب‌نگاشت کلارک (ضریب ذخیره کلارک) نسبت به افزایش بسیار حساس است. این نتایج مشابه نتایجی بود که فلمینگ و نیری (۲۰۰۴) در تحلیل حساسیت مدل پیوسته HEC-HMS که برای حوضه Dale Hollow واقع در حوضه رودخانه Comberland در امریکا عملی ساختند و بشار و زکی (۲۰۰۷) در حوضه رودخانه نیل به آن دست یافتند.

۵ نتیجه‌گیری

با توجه به تعدد و تنوع مدل‌های هیدرولوژی موجود، انتخاب بهترین مدل دشوار است و نیاز به مقایسه مدل‌ها برای تشخیص قابلیت‌ها و محدودیت‌های مدل دارد. به‌طورکلی مدل‌های بارش رواناب محدودیت‌های بسیاری دارند و به دقت متوسطی می‌رسند. از طرف دیگر جریان در حوضه‌های خشک و نیمه‌خشک تمایل به واکنش سریع به وقایع بارش دارد (ویتر ، ۲۰۰۲). همچنین در این حوضه‌ها اکثر وقایع اغلب از نظر مکانی متغیر، و داده‌های بارش ناکافی هستند که این موارد در شبیه‌سازی دقیق رواناب محدودیت ایجاد می‌کند. در این تحقیق عملکرد سه مدل مفهومی HBV، IHARCES و HEC-HMS در شبیه‌سازی رواناب حوضه نیمه‌خشک اعظم هرات مورد ارزیابی قرار گرفته و حساس‌ترین پارامترهای هرمدل مشخص شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان داد که مدل HBV در هر دو دوره (واسنجی و صحت‌سنجی) دارای عملکرد خوبی است. شبیه‌سازی رواناب با این مدل قابل‌قبول و حاکی از کارایی مدل در مناطق نیمه‌خشک است که با نتایج لاو و همکاران (۲۰۱۰) که این مدل را در مناطق نیمه‌خشک کارآمد می‌دانست، مشابه است. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که پارامتر UZL و MAXBAS و BETA از پارامترهای حساس است و نتایج خروجی را به‌شدت تحت‌تاثیر قرار می‌دهد. از طرف دیگر مدل هیدرولوژیکی پیوسته HEC-HMS برای حوضه رودخانه اعظم براساس الگوریتم SMA به کار برده شد.

Archive of SID

www.SID.ir

نتایج مدل با در نظر گرفتن پارامترهای یکپارچه و بارش زمانی یکنواخت در حوضه تقریباً قابل‌قبول نیست. با توجه به اینکه اکثر پارامترهای الگوریتم مربوط به محاسبات تلفات (مانند: بیشترین میزان نفوذ ، عمق خاک، نرخ نفوذ عمقی و اجزای لایه‌های زیرزمینی) تاثیر زیادی بر جریان شبیه‌سازی شده دارند و بقیه پارامترها برای تطابق حجم و دبی اوج و زمان رسیدن به اوج و شکل آب‌نگاشت است (که این پارامترها بسته به نوع خاک، پوشش گیاهی و کاربری اراضی متفاوت‌اند) در نظر گرفتن یک مقدار متوسط برای این پارامترها در کل حوضه یکی از عوامل خطا و موجب کاهش کارایی آن است. همچنین این الگوریتم یک ساختار خطی دارد و ممکن است در تبدیل بارش به رواناب فرآیندهای غیرخطی وجود داشته باشدکه با در نظر نگرفتن آن خطا ایجاد می‌شود که این عامل علت برآورد کم جریان در فصل بهار و زمستان و شبیه‌سازی دست‌بالای جریان در فصل پاییز و زمستان است. البته فصلی بودن (دوره‌های خشک و تر)، توزیع مکانی بارش، ناهمگنی خاک و پوشش گیاهی و غیرخطی بودن تلفات در مناطق خشک از منابع خطا در شبیه‌سازی رواناب در حوضه است (مک اینتایر و القریشی، ۲۰۰۹). در این مدل دوره‌های ترسالی به‌شدت وزن‌دهی می‌شوند که از این راه می‌توان اطمینان حاصل کرد که مدل به دقت این دوره‌ها را شبیه‌سازی می‌کند. همچنین در این مدل سه پارامتر مربوط به الگوریتم SMA (Soil storage، Max infiltration و Tension storage) از پارامترهای حساس ارزیابی شدند. در شبیه‌سازی با IHACRES در مناطق خشک و نیمه‌خشک گام زمانی بسیارمهم است. در این مناطق اغلب خطاهای شبیه‌سازی ناشی از داده‌های گم‌شده یا پیچیدگی رفتار اقلیم منطقه است. البته این مدل هم دارای نتایج خوبی است و چنین استنباط می‌شود که می‌توان از آن در شبیه‌سازی و پیش‌بینی رواناب استفاده کرد. این مدل تعداد پارامترهای محدودی دارد که حساسیت زیادی به تغییرات پارامترها از خود نشان نداد. از طرف دیگر باید توجه داشت که هرسه مدل در برآورد دبی‌های حداکثر، عملکرد ضعیف و غیر قابل‌قبولی داشته‌اند. به‌عبارت دیگر، هر سه مدل دبی‌های حداکثر در منطقه را کم برآورد کرده‌اند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از این سه مدل در تحقیقاتی که هدف آن شبیه‌سازی دبی‌های حداکثر در این حوضه است قابل توصیه نیست.

باید توجه داشت که در این تحقیق مدل HEC-HMS به‌صورت غیر توزیعی (Lumped) استفاده شد که می‌توان با داشتن اطلاعات جامع‌تر از حوضه‌ها به‌صورت توزیعی (Distributed) استفاده کرد .همچنین باید توجه داشت که کاربرد مدل‌های گوناگون بارش –رواناب در حوضه‌های با اقلیم متفاوت و مقایسه عملکرد آنها، می‌تواند در تعیین مناسب‌ترین مدل، تأثیرگذار باشد که این امر می‌باید طی تحقیق‌های دیگر مورد بررسی قرار گیرد. از طرف دیگر به‌منظور تعمیم نتایج این تحقیق به حوضه‌های نیمه‌خشک، می‌باید تحقیق مشابهی در حوضه‌های پُرآب و کم‌آب مناطق خشک و نیمه‌خشک دیگر کشور صورت بگیرد و نتایج آن با تحقیق حاضر مقایسه شود.

مراجع

خطیبی، س.، ۱۳۹۰، توسعه مدل‌های منطقه‌ای بارش-رواناب، پایان‌نامه، دانشگاه صنعتی شریف.

گودرزی، ا.، ۱۳۸۹، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رژیم جریان‌های سیلابی حوزه رودخانه اعظم هرات- یزد، پایان نامه، دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی دانشگاه یزد.

گودرزی، م.، ذهبیون، ب.، مساح بوانی، ع.، ر. و کمال، ع. ر.، ۱۳۹۱، مقایسه عملکرد سه مدل هیدرولوژی SIMHYD و SWAT، IHACRES در شبیه‌سازی

Archive of SID

www.SID.ir

رواناب حوضه قره‌سو. مدیریت آب و آبیاری، **۲**(۱)، ۲۵-۴۰.

Abushandi, E, and Merkel, B., 2011, Rainfall estimation over the Wadi Dhuliel arid Catchment, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., **8**, 1665-1704.

Al-Qurashi, A., McIntyre, N., Wheater, H. and Unkrich, C., 2008, Application of the Kineros2 rainfall–runoff model to an arid catchment in Oman, Journal of Hydrology, **355**(1-4), 91-105.

Abebe, N., Ogden, F. L. and Pradhan, N. R., 2010, Sensitivity and uncertainty analysis of the conceptual HBV rainfall–runoff model: Implications for parameter estimation, Journal of Hydrology, **389**, 301-310.

Bahat, Y. and Grodek, T., Lekach, J. and Morin, E., 2009, Rainfall–runoff modeling in a small hyper-arid catchment, Journal of Hydrology, **373**, 204-217.

Bashar, K. E. and Zaki, A. F., 2007, SMA Based continuous hydrologic simulation of the Blue Nile, Reports published on internate.

Bergstrom, S., 1976. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments, SMHI Report RHO 7, Norrkoping, 134 pp.

Butts, B. M., Payne, T. J., Kristensen, M. and Madsen, H., 2004, An evaluation of the impact of model structure on hydrological modeling uncertainty for stream flow simulation, Jornal of Hydrology, **298**, 242-266.

Croke, B. F. M. and Jakeman, A. J., 2008, Use of the IHACRES rainfall-runoff model in arid and semi-arid regions.

Cunderlik, M. J. and Siminovic, S. P., 2004, Calibration, verification and sensitivity analysis of the HEC-HMS hydrologic model, Water resource research report.department of civil and environmental engineering, the university of Wester Ontario, Canada.

Faures, J. M., Goodrich, D. C., Woolhiser, D. A. and Sorooshian, S., 1995, Impact of small scale spatial rainfall variability on runoff modelin, Journal of Hydrology, **173**(1-4), 309-326.

Fleming, M. and Neary, V., 2004, Continuous hydrologic modeling study with the hydrologic modeling system, Jornal of Hydrology. Eng., **9**(3), 175-183.

Haan, C. T., 2002, Statistical methods in hydrology, Second edition, Iowa state press, 496p.-90.

Hydrologic Engineering Center (HEC), 2000, Hydrologic modeling system HEC–HMS: technical reference manual, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, Calif.

Jin, X., Xu, C. U., Zhang, O. and Chen, Y. D., 2009, Regionalization study of a conceptual hydrological model in Dongjiang basin, south china. Quaternary International, 129-137.

Jakeman, A. J. and Hornberger, G. M., 1993, How much complexity is warranted in a rainfall-Runoff model?, Water resources research., **29**(8), 2637-2649

Love, D., Uhlenbrook, S., Corzo-Perez, G., Twomlow, S. and van der Zaag, P., 2010, Rainfall interception–evaporation–runoff relationships in a semi-arid mesocatchment, northern Limpopo Basin, Zimbabwe. Hydrol., Sci. J., **55**(5), 687-703.

Masih, I., Uhlenbrook, S., Maskey, S. and Ahmad, M. D., 2010, Regionalization of a conceptual rainfall–runoff model based on similarity of the flow duration curve: a case study from the semi-arid Karkheh basin, Iran, Journal of Hydrology, **391**, 188-201.

McIntyre, N. and Al-Quarashi, A., 2009, Performance of ten rainfall–runoff models applied to an arid catchment in Oman, Environmental Modelling & Software, **24,** 726-738.

Pilgrim, D. H., Chapman, T. G. and Doran, D. G., 2009, Problems of rainfall-runoff modeling in arid and semiarid regions, Hydrological Sciences Journal, **33**(4), 379-400.

Rahimi, M., Saghafian, B., Azadi, M. and Sedghi, H., 2010, Flood forecasting in arid and semi arid region using continuous hydrological modeling, World applied science journal, **10**(6), 645-654.

Rezaeian Zadeh, M., Hosseinpour, Z., Abghari, H., Nikian, A., Shaeri Karimi, S. and Morad Zade Azar., F., 2010, Geophysical Research Abstracts, **12**, EGU2010-6313-1.

Roy, D., Begam, S., Ghosh. S. and Jana, S., 2013, Calibration and validation of HEC-HMS model for a river basin in eastern India, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, **8**(1),40-56.

Shamir, E., Meko, D. M., Graham, N. E. and Georgakakos, K. P., 2007, Hydrologic model framework for water resources planning in the Santa Cruz River, southern Arizona, Journal of the American Water Resources Association, **43**(5), 1155-1170.

Seibert, J., 2000, Multi-criteria calibration of a

Archive of SID

www.SID.ir

Unkrich, C., Goodrich, D., Schaffner, M. and Stewart, A., 2008, Understanding uncertainty in distributed flash flood forecasting for semiarid regions, Water Resources Research, **44**(5), 1-2.

Wheater, H. S., 2002, Hydrological processes in arid and semi arid areas, Hydrology of Wadi Systems, UNESCO, Paris.

conceptual runoff model using agenetic algorithm. Hydrol. Earth Syst. Sci. **4**(2), 215-224.

Siebert, J. and Vis, M. J. P., 2012, Teachinghydrological modeling with a user-friendly catchment runoff-model software package, Earth Syst. Sci., **16**, 3315-3325.

Yatheendradas, S., Wagener, T., Gupta, H.,

Archive of SID

www.SID.ir